کنترل فعال سازه‌ها با استفاده از روش انرژي

سیدعلي علوي‌نسب[۱]، حمید محرمي[*۲]، وحید جوهري مجد[۳]، منصور ضیائي‌فر[۴] و امیر خواجه پور[۵]

[۱]دانشجوي دکتري مهندسي عمران – دانشکده فني - دانشگاه تربیت مدرس
[۲]استادیار گروه مهندسي عمران – دانشکده فني - دانشگاه تربیت مدرس
[۳]استادیار گروه مهندسي برق – دانشکده فني - دانشگاه تربیت مدرس
[۴]استادیار پژوهشگاه بین‌المللي زلزله‌شناسي و مهندسي زلزله
[۵]استاد بخش مکانیک دانشکده مهندسي - دانشگاه واترلو کانادا

(تاریخ دریافت ۸۴/۵/۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۲/۱۳، تاریخ تصویب ۸۵/۱/۲۶)

چکیده

در این مقاله یک روش جدید با استفاده از ترکیب انرژي سازه و روش کنترل بهینهLQR براي کنترل فعال سازه ها پیشنهاد شده است. مزیت این روش حذف سعي و خطا در پیدا کردن نیروي کنترلي مناسب است..در این روش ماتریس بهره با استفاده ازمعادلات انرژي سازه بدست مي آید و براي زلزله هاي مختلف ثابت مي ماند.

براي نشان دادن کارایي روش پیشنهادي، یک ساختمان سه طبقه با دو تاندون فعال در طبقه اول و سوم در نظر گرفته شده است. پاسخ سازه در روش پیشنهادي با دیگر روشهاي استفاده شده در مقالات براي انتخاب ماتریس بهره کنترل بهینه تحت سه زلزله مختلف مقایسه شده اند. مقایسه تغییر مکانها و نیروهاي کنترلي نشان مي دهد اگرچه در روش پیشنهادي بیشینه تغییر مکانهاي سازه اندکي بیشتر از بیشینه تغییر مکانهاي روش کنترل بهینه مي باشد اما نیروهاي کنترلي به طور قابل ملاحظه اي کاهش مي یابند. همچنین مقایسه نتایج اعمال روش براي ورودي زلزله با مقیاسهاي مختلف نشان مي دهد که کارایي الگوریتم پیشنهادي براي زلزله با شدتهاي مختلف تغییر نمي کند

واژه هاي کلیدي: روش انرژي - کنترل فعال سازه - کنترل بهینه LQR - زلزله

مقدمه

از اوایل دهه ۱۹۷۰ میلادي، از کنترل فعال و غیر فعال براي کاهش ارتعاشات سازه ها و افزایش ایمني ساختمانها در برابر نیروهاي باد و زلزله مورد استفاده قرار گرفته است[۱]. استفاده از کنترل فعال و غیرفعال سازه ها داراي مزایا و معایبي مي باشند. در کنترل غیر فعال سازه ها، انرژي ناشي از زلزله توسط وسایل مکانیکي مانند کمک فنرها که کنترل آن احتیاجي به نیروي خارجي و دستور کنترلي پیوسته ندارد مستهلک مي شود. در این روش، تنظیم فرکانس طبیعي و مقادیر مِیرایي کمک فنر ها تنها یکبارانجام شده و مقادیر میرایي میراگرها ثابت و مستقل از نیروي زلزله مي باشد. اما در سیستمهاي کنترل فعال فرمان نیروي کنترلي همزمان[۱] که توسط کنترل فعال سازها به سازه اعمال مي شود احتیاج به مقدار زیادي نیروي خارجي دارد.

روشهاي کنترلي براي کنترل فعال سازه ها عبارت از روش کنترل بهینه(LQR)، روش کنترل مد لغزشي(SMC)، روش کنترلي پیش بیني کننده(MPC)، و روشهاي کنترلي مقاوم H_∞ و H_2 مي باشد. متداولترین روش کنترلي در کنترل فعال سازه ها روش کنترل بهینه (LQR) مي باشد[۲-۶] . مدل کنترلي پیش بیني کننده (MPC) الگوریتم دیگري است که بر اساس ترکیب الگوریتمهاي کنترل پیش خور و پس خور در کنترل فعال سازه ها استفاده شده است. بعضي از محققین از(SMC)[۲] استفاده نموده اند[۸-۹] .

مطالعات زیادي براي پیدا کردن روش کنترلي مناسب بر اساس انرژي سازه انجام شده است[۱۰-۱۲] . در هنگام زلزله توزیع انرژي کل در سازه بستگي به مشخصات سازه مانند فرکانس طبیعي سازه دارد. بخشي از انرژي ورودي

* نویسنده مسئول : تلفن : ۳۳۲۴ – ۸۸۰۱۱۰۰۱ – ۰۲۱ , فاکس : ۳۳۲۴ – ۸۸۰۱۱۰۰۱ – ۰۲۱ , Email: hamid@modares.ac.ir

مستهلک مي شود و بخشي ديگر موجب حرکت سازه مي شود. دو روش مختلف براي مشخص کردن انرژي در سازه ها عبارت از روش انرژي مطلق و نسبي مي باشند. اين روشها به صورت گسترده اي در آناليز سازه ها مورد استفاده قرار گرفته اند[۱۳]. با مطالعات بيشتر مشخصات انرژي و انتقال انرژي سازه ها هنگام زلزله، متوان يک مفهوم فيزيکي براي کنترل و محافظت سازه ها در برابر زلزله ارائه کرد.

يافتن کنترل کننده مناسب براي کنترل فعال سازه ها بستگي به بار ديناميکي وارده دارد. در اکثر مواقع اين نيروي کنترلي بيش از ظرفيت فعال سازها مي باشد و مساله اشباع شدگي اتفاق مي افتد و در نتيجه کنترل بهينه دلخواه حاصل نمي شود[۱۴].

پارامتر ديگري که در طراحي يک کنترل کننده مناسب حائز اهميت مي باشدمقدار نيروي خارجي است. همانطور که در اين مقاله نشان داده شده است پيدا کردن يک ماتريس بهره مناسب که هم پاسخ سازه و هم نيروي کنترلي را کمينه کند بسيار حائز اهميت مي باشد. مطالعات زيادي براي يافتن ماتريس بهره مناسب بر اساس روش سعي و خطا انجام گرفته است[۱۵].

دراين مقاله يک فرمولبندي کنترلي جديد بر اساس انرژي سازه براي کنترل فعال سازه ها ارائه مي شود که از آن ماتريس بهره جديدي بدست مي آيد که با ماتريسهاي بهره روشهاي کنترل بهينه کلاسيک متفاوت است وبرخلاف روشهاي کلاسيک، نيروي کنترلي بهينه را بدون سعي و خطا بدست مي دهد. فرمولبندي روش جديد پيشنهادي، در بخش ۴ بطور کامل ارائه شده است. براي نشان دادن قابليتهاي روش جديد، تغيير مکان و نيروي کنترلي اين روش با ديگر روشهاي مقايسه شده است. در مثالهاي عددي ارائه شده، نشان داده شده است که اولاً نيروي کنترلي بهينه متناظر با کمترين پاسخ سازه نيست. ثانياً روشهاي کلاسيک کنترل بهينهLQR عليرغم ذات تکراري شان به خودي خود نيروي کنترلي بهينه را بدست نمي دهند و ثالثاً روش پيشنهادي جديد بدون سعي و خطا نيروي کنترلي بهينه را با تقريب بسيار خوبي بدست مي دهد

معادلات حرکت

در کنترل فعال يک ساختمان تحت تحريک پايه، معادلات حرکت سازه به صورت زير نوشته مي شود[۱۵]:

$$M\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+Kx(t)=-ME\ddot{X}_g(t)+Du(t) \quad (۱)$$

که در آن $x=[x_1, x_2,..., x_n]^T$ بردار n بعدي تغيير مکان‌هاي نسبي مي‌باشد، M، C و K به ترتيب ماتريس‌هاي n×n جرم، ميرايي و سختي و $\ddot{X}_g$ شتاب زمين ناشي از زلزله مي‌باشد. بردار E، بردار تأثير n×1 براي تعيين موقعيت نيروهاي ناشي از شتاب زلزله بر روي درجات آزادي سازه مي‌باشد. همچنين ماتريس $D_{n\times m}$ ماتريس موقعيت نيروهاي کنترلي و u(t) بردار m بعدي از فعال‌سازي نيروهاي کنترلي مي‌باشد. معادله حرکت (۱) برحسب متغير حالت z به صورت زير مي‌تواند باز نويسي شود:

$$\dot{Z}(t)=AZ(t)+Bu(t)+Hf(t) \quad (۲)$$

که در آن:

$$Z(t)=\begin{bmatrix}x(t) & \dot{x}(t)\end{bmatrix}^T \quad (۳)$$

$$A=\begin{bmatrix}0 & I\\ -M^{-1}K & -M^{-1}C\end{bmatrix} \quad (۴)$$

$$B=\begin{bmatrix}0\\ M^{-1}D\end{bmatrix} \quad (۵)$$

$$H=\begin{bmatrix}0\\ -E\end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$f(t)=\ddot{X}_g(t) \quad (۷)$$

اين شکل از معادلات حرکت به صورت گسترده‌اي در کنترل سازه‌ها مورد استفاده قرار گرفته است.

الگوريتم کنترل بهينه LQR

الگوريتم کنترلي کنترل بهينه LQR به طور گسترده در کنترل فعال سازه‌ها استفاده شده است. در اين روش نيروهاي کنترلي در هر لحظه براساس سرعت و تغيير مکان سازه محاسبه مي‌شوند. در تئوري‌هاي کنترل بهينه کلاسيك، نيروي خارجي به صورت يك اغتشاش درنظر گرفته مي‌شود، با در نظر گرفتن نيروي زلزله به صورت

اغتشاش معادله (۲) به صورت زير مي‌تواند نوشته شود [۱۶،۱۷]:

$$\dot{Z}(t) = A\,Z(t) + B\,u(t) \qquad (۸)$$

در روش LQR، كنترل بهينه با تنظيم كردن وزن‌هاي شاخص هزينه J كه به صورت زير تعريف مي‌شود بدست مي‌آيد:

$$J = \int_0^{\infty} [Z^T(t)QZ(t) + u^T(t)Ru(t) + 2Z(t)^T Nu(t)]dt \qquad (۹)$$

ماتريس‌هاي Q، R و N ماتريس‌هاي وزن براي كمينه‌سازي J مي‌باشند و ماتريس‌هاي Q و R به ترتيب ماتريس‌هاي مثبت نيمه معين و معين درنظر گرفته مي‌شوند. نيروي كنترلي براساس حل معادله جبري ريكاتي محاسبه مي‌شود. از كمينه‌سازي شاخص هزينه J نيروهاي كنترلي u(t) و ماتريس‌هاي بهره G به صورت زير بدست مي‌آيد:

$$u(t) = -\frac{1}{2}R^{-1}(B^T P + N^T)Z(t) = -GZ(t)$$
$$= -[G_x \quad G_{\dot{x}}]\begin{bmatrix} x(t) \\ \dot{x}(t) \end{bmatrix} \qquad (۱۰)$$

كه در آن G ماتريس بهره ناميده مي‌شود. ماتريس P از حل معادله كلاسيك ريكاتي و از رابطه زير بدست مي‌آيد:

$$A^T P + PA - (PB + N)R^{-1}(B^T P + N^T) + Q = 0 \qquad (۱۱)$$

در مقالات مختلف مقادير گوناگوني براي ماتريس‌هاي Q و R به صورت يكي از ماتريس‌هاي وزن زير استفاده شده است:

- ماتريس يكه براي Q و R [۳-۵ و ۱۵]
- ماتريس‌هاي قطري براي Q و R [۲و۱۶]
- تركيبي از ماتريس‌هاي سختي و جرم به صورت زير [۶ و ۱۱ و ۱۲]

$$Q = q\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \qquad R = I\,,\ N = 0 \qquad (۱۲)$$

با افزايش مقدار q و متناسباً افزايش مقدار Q نسبت به R، كنترل بيشتري روي بردار حالت يا پاسخ سيستم اعمال مي‌شود. براي اين منظور، محققين در مقالات خود ماتريس‌هاي وزن مختلفي را پيشنهاد كرده اند [۲-۶ و ۱۲].

با توجه به اينكه استفاده از مقادير بزرگ q سبب بروز پديده اشباع شدن و كاهش كارايي كنترلگر مي شود، تنظيم كردن آن در برابر زلزله‌هاي متفاوت براي روش كنترل بهينه LQR مسأله حائز اهميتي مي باشد. هدف اصلي اين مقاله ارائه يك الگوريتم جديد با كارايي مناسب بدون احتياج به تنظيم كردن ماتريس بهره به صورت سعي و خطا مي باشد. الگوريتم پيشنهادي يك روش كنترل بهينه خطي اصلاح شده است كه تنظيم ماتريس‌هاي وزن در آن براساس كمينه كردن انرژي سازه صورت مي گيرد. با استفاده از اين روش مي توان يك مفهوم فيزيكي را به الگوريتم كنترلي اضافه نمود. اين روش قابل استفاده براي كنترل فعال ارتعاشات كليه سازه‌ها مي‌باشد.

روش پيشنهادي

معادلات انرژي نسبي سازه از انتگرالگيري كار حاصل از مولفه هاي نيرويي معادله حركت (۱) در جابجـايي dx به صورت زير نوشته مي شود [۱۳]:

$$\int_{x(0)}^{x(t_k)} \ddot{x}(t)^T M dx + \int_{x(0)}^{x(t_k)} \dot{x}(t)^T C dx + \int_{x(0)}^{x(t_k)} x(t)^T K dx$$
$$= -\int_{x(0)}^{x(t_k)} E^T M\ddot{X}_g(t)dx + \int_{x(0)}^{x(t_k)} u(t)^T D^T dx \qquad (۱۳)$$

رابطه فوق بيانگر انواع انرژيهايي است كه در نتيجه حركت، در سازه توليد مي شود و به ترتيب عبارتند از:

= انرژي پتانسيل + انرژي مستهلك شده + انرژي جنبشي

انرژي ناشي از نيروهاي كنترلي + انرژي وارده ناشي از حركت زمين با تغيير متغير $dx = \dot{x}(t)dt$ ، سمت چپ معادله (۱۳) را مي توان به صورت زير نوشت:

$$\int_{t=0}^{t=t_k} \ddot{x}(t)^T M\dot{x}(t)dt +$$
$$\int_{t=0}^{t=t_k} \dot{x}(t)^T C\dot{x}(t)dt + \int_{t=0}^{t=t_k} x(t)^T K\dot{x}(t)dt \qquad (۱۴)$$

معادله فوق بر حسب متغير حالتZ مي تواند به صورت زير نوشته شود:

انرژي سازه = $\int_{t=0}^{t=t_k} (\frac{d}{dt}Z^T(t))Q^*Z(t)\,dt$ (۱۵)

که در آن ماتریس Q^* بصورت زیر خواهد بود.

انرژي سازه = $Q^* = \begin{bmatrix} K & C \\ 0 & M \end{bmatrix}$

(۱۶)

با انتگرالگیري جزء به جزء از معادله (۱۵) داریم:

$$\int (\frac{d}{dt} Z^T(t)) Q^* Z(t) dt =$$

$$Z^T(t) Q^* Z(t) - \int Z^T(t) Q^* (\frac{d}{dt} Z(t)) dt$$

(۱۷)

با توجه به اینکه حاصل انتگرالها در دو طرف رابطه (۱۷) یک کمیت اسکالر است، انتگرالهاي رابطه فوق که ترانهاده یکدیگر هستند با هم مساوي مي باشند. در نتیجه داریم:

انرژي سازه = $$\int (\frac{d}{dt} Z^T(t)) Q^* Z(t) dt = \frac{1}{2} Z^T(t) Q^* Z(t)$$

(۱۸)

سمت راست رابطه (۱۸) یک تابع مرتبه ۲ است و براحتي مي توان ثابت نمود که آنرا مي توان با عبارت زیر جایگزین نمود

انرژي سازه $= \frac{1}{2} Z^T(t) \hat{Q} Z(t)$

(۱۹)

که در آن ماتریس $\hat{Q}$ یک ماتریس متقارن به صورت زیر مي باشد:

$$\hat{Q} = \begin{bmatrix} K & \frac{C}{2} \\ \frac{C}{2} & M \end{bmatrix}$$

(۲۰)

انتگرال نیروي کنترلي در سمت چپ معادله(۱۳) به صورت زیر تعریف مي شود:

انرژي نیروي کنترلي =

$$-\int u(t)^T D^T dx = -\int u(t)^T D^T \dot{x}(t) dt$$

(۲۱)

با فرض ثابت بودن نیروي کنترلي u(t) براي فاصله زماني t_k وt_{k+1} خواهیم داشت:

انرژي نیروي کنترلي =

$$= -u(t)^T D x(t) \Big|_{t_k}^{t_{k+1}} = -u(t)^T N^* Z(t) \Big|_{t_k}^{t_{k+1}}$$

(۲۲)

که در آن:

$$N^* = D_{n\times m} \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix}_{m\times 2n}$$

(۲۳)

اکنون با هدف کمینه کردن انرژي سازه و بیشینه کردن انرژي کنترلي براي فاصله زماني t_k وt_{k+1} مي توان رابطه زیر را کمینه کرد:

انرژي ورودي به سازه

$$= \frac{1}{2} Z^T(t) \hat{Q} Z(t) \Big|_{t_k}^{t_{k+1}} + u(t)^T N^* Z(t) \Big|_{t_k}^{t_{k+1}}$$

(۲۴)

چنانچه بخواهیم کل انرژي ورودي به سازه از لحظه صفر تا پایان تحریک زلزله به حداقل برسد رابطه زیر باید مینیمم شود:

$$J = \int_{t=0}^{\infty} (Z^T(t) Q Z(t) + 2u(t)^T N Z(t)) dt$$

$$Q = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} K & \frac{C}{2} \\ \frac{C}{2} & M \end{bmatrix} \quad N = \frac{1}{2} D_{n\times m} \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix}_{m\times 2n}$$

(۲۵)

رابطه (۲۵) بسیار شبیه رابطه (۹) در روش LQR است با این تفاوت که در آن ماتریس وزن R معادل صفر است. یک راه براي حل معادله (۲۵) آنست که آنرا به صورت رابطه (۹) نوشت و ماتریس R را به سمت صفر میل داد. در این صورت براي حل معادله (۲۵) نوعي حل LQR بکار گرفته مي شود. لیکن براي ارضاي شرط پایداري، مقدار R یك مقدار مثبت درنظر گرفته شده است به طوري که حد آن به سمت صفر میل کند. درنتیجه معادله (۲۵) به صورت زیر بازنویسي خواهد شد:

$$J = \lim_{R\to 0} \int_0^{\infty} [Z^T(t) Q Z(t) + u^T(t) R u(t) + 2Z(t)^T N u(t)] dt$$

(۲۶)

با تغییر متغیر $\overline{Z}(t) = GZ(t) + Hu(t)$ معادله استاندارد (۹) را مي توان به فرم ساده شده زیر بازنویسي کرد:

$$J = \int_0^{\infty} [\overline{Z}^T(t) \overline{Q} \overline{Z}(t) + u^T(t) \overline{R} u(t)] dt$$

(۲۷)

که در آن:

$$Q = G^T \overline{Q} G$$
$$R = H^T \overline{Q} H + \overline{R}$$
$$N = G^T \overline{Q} H$$

(۲۸)

شرط لازم براي اينكه معادله (۲۷) داراي جواب باشد اين است كه ماتريسهاي $\overline{R}$ و $\overline{Q}$ مثبت معين باشد. در نتيجه، براي اينكه در كنترل بهينه LQR معادله (۹) نيروهاي كنترلي جواب‌هاي قابل قبولي داشته باشد، مي بايست ماتريس وزن R معادله زير را ارضا نمايد[۱۶] :

$$Q - NR^{-1}N \geq 0$$

(۲۹)

بوسيله انتخاب اين ماتريس وزن، يك ماتريس بهره واحد براي كنترل سازه‌ها براساس مفهوم انرژي در سازه بدست مي‌آيد. كه نسبت به ماتريسهاي بهره روشهاي موجود عملكرد بهتري دارد.

مثال‌هاي عددي

بمنظور مقايسه كارايي ماتريس بهره روش پيشنهادي با ماتريسهاي بهره روشهاي موجود، يک سازه سه طبقه با روشهاي مختلف كنترلي مورد ارزيابي قرار گرفته است. نتايج حاصل از مقايسه روشها بيانگر كارايي بيشتر ماتريس بهره پيشنهادي در كنترل فعال سازه‌ها مي‌باشد. براي مطالعات عددي، مدل يک ساختمان سه طبقه مطابق شكل (۱) به صورت قاب برشي با طبقات صلب مشابه كه در مرجع [۱۸] ارائه شده، در نظر گرفته شده است.

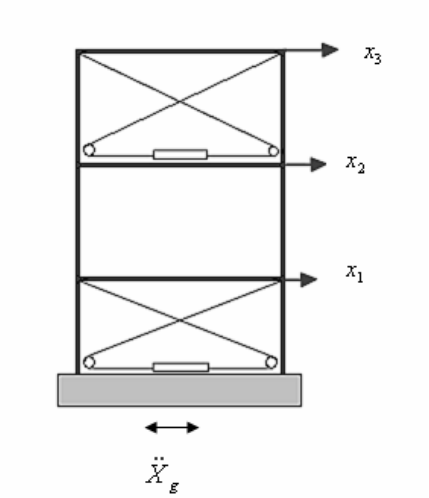
مشخصات سازه‌اي درنظر گرفته شده براي اين مثال عبارتند از:

$$M = \begin{bmatrix} 200.4 & 0 & 0 \\ 0 & 200.4 & 0 \\ 0 & 0 & 178 \end{bmatrix} [kg]$$

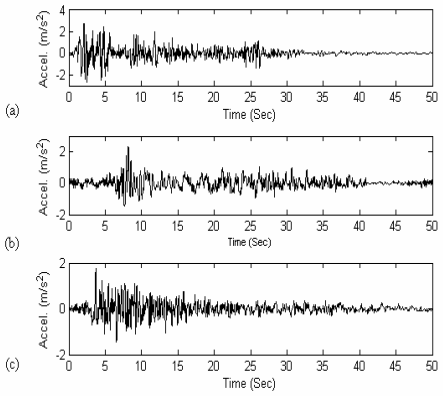
$$K = \begin{bmatrix} 238.932 & -119.466 & 0 \\ -119.466 & 238.932 & -119.466 \\ 0 & -119.466 & 119.466 \end{bmatrix} [kN/m]$$

$$C = \begin{bmatrix} 264.99 & -78.09 & -16.08 \\ -78.09 & 246.89 & -92.15 \\ -16.08 & -92.15 & 162.02 \end{bmatrix} [N.\sec/m]$$

همچنين بيشترين نيروي كنترلي اعمال شده توسط كنترل فعال سازه‌ها به (N) 1000 محدود شده است. سازه فوق تحت سه زلزله مختلف آناليز شده است: زلزله السنترو ۱۹۴۰، هشينوهه و تفت. شتابنگاشتهاي ناشي از اين زلزله‌ها در شكل (۲) نشان داده شده است:



شكل ۱: مدل يك ساختمان سه طبقه با دو تاندون فعال در طبقه اول و سوم.



شكل ۲: شتابنگاشت زلزله‌هاي: الف) السنترو ب) هشينوهه ج) تفت برحسب m/s^2.

پرواضح است كه انتخاب Q و R در روش كنترل بهينه LQRتأثير به سزايي در پاسخ سازه خواهد داشت. در مقالات [۳-۶، ۱۱-۱۲، ۱۵] ماتريس‌هاي وزن زير استفاده شده اند:

$$Q_1 = 10^{q_i}\begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \qquad Q_2 = 10^{q_i}\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

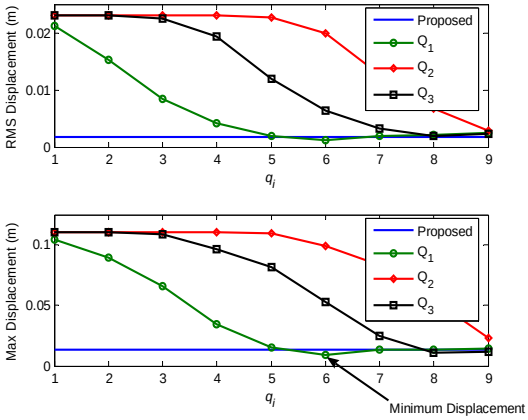
$$Q_3 = 10^{q_i}\begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \qquad Q_4 = 10^{q_i}\begin{bmatrix} K & C \\ C & M \end{bmatrix}$$

$$R = I\,,\ N = 0$$

(۳۰)

در رابطه فوق و نيز رابطه (۲۵)، I و0 به ترتيب اشاره به ماتريس‌هاي واحد و صفر دارند. نتايج بدست آمده براي حالت Q_1 و Q_4 براي بيشتر حالت‌ها بسيار شبيه به

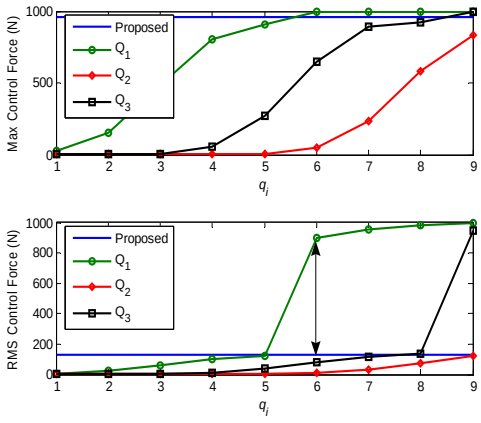
يكديگر بوده است بنابراين فقط نتايج براي سه حالت اول نشان داده شده و با حالت پيشنهادي مقايسه شده‌اند.



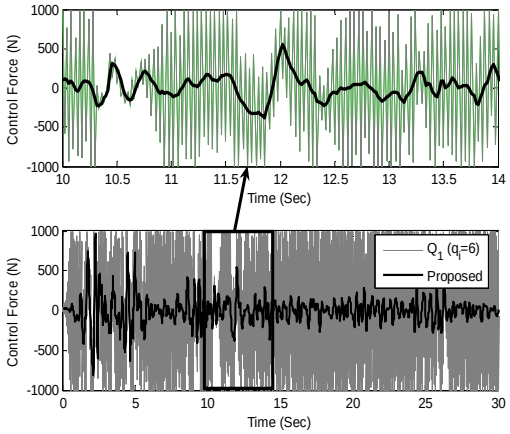
شكل ۳: تغيير مكان طبقه سوم با استفاده از ماتريسهاي وزن مختلف در اثر زلزله السنترو.

در شكل (۳)، مجذور ميانگين مربعها و بيشترين مقدار تغيير مكان‌ها در اثر زلزله السنترو با ضرايب مختلف q_i نشان داده شده است. همانطور كه در شكل (۳) نشان داده شده است، كمترين تغيير مكان سازه در كنترل بهينه LQR Q_1 با $(q_i=6)$ بدست مي‌آيد، اما همانطور كه در شكل (۴) نشان داده شده است در اين حالت احتياج به مقدار زيادي نيروي كنترلي مي باشد.

در شكل (۴)، تفاوت كوچكي بين ماكزيمم تغيير مكانهاي روش پيشنهادي و Q_1 با $(q_i=6)$ ديده مي‌شود. بيشترين تغيير مكان طبقه سوم در روش پيشنهادي در حدود ۸۶% كمتر از حالت كنترل نشده است اما اين مقدار در روش Q_1 با $(q_i=6)$ در حدود ۹۱% مي‌باشد يعني ۵% اختلاف بين روش پيشنهادي وQ_1 با $(q_i=6)$ ملاحظه مي شود. با درنظر گرفتن مجذور ميانگين مربع تغيير مكان‌ها مقدار اين تفاوت بين حالت پيشنهادي و Q_1 با $(q_i=6)$ كمتر مي‌باشد. در حاليكه مقدار مجذور ميانگين مربع نيروي كنترلي در روش Q_1 با $(q_i=6)$ در حدود ۹ برابر بيشتر از روش پيشنهادي مي‌باشد. تفاوت اصلي بين مجذور ميانگين مربع نيروي كنترلي روش پيشنهادي Q_1 و $(q_i\geq6)$ دراثر پديده اشباع شدن مي‌باشد. در نتيجه، با توجه به اينكه در روشهاي متداول، سعي و خطا براي رسيدن به حد اكثر كنترل پاسخ سازه اي است، اين روش ما را به سمت Q_1 با $(q_i=6)$ هدايت مي كند. حال آنكه Q_1 با $(q_i=5)$ با توجه به نسبت انرژي نيروي كنترلي به كاهش پاسخ سازه مقدار مناسبتري را ارائه مي دهد و اين نكته البته در روشهاي متداول مغفول مانده است. در حاليكه اين مقدار در روش پيشنهادي بدون سعي و خطا بدست مي آيدو انرژي كنترلي نيز بهينه است و اين نكته خود يكي از مزاياي روش پيشنهادي است..در شكل(۵)، تغييرات نيروي كنترلي در Q_1 با $(q_i=6)$ و روش پيشنهادي در اثر زلزله السنترو نشان داده شده‌اند.

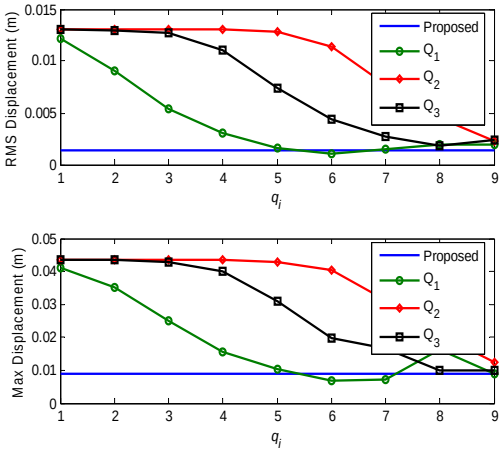


شكل ۴: مقايسه نيروهاي كنترلي در تاندون‌هاي فعال در طبقه سوم در زلزله السنترو.

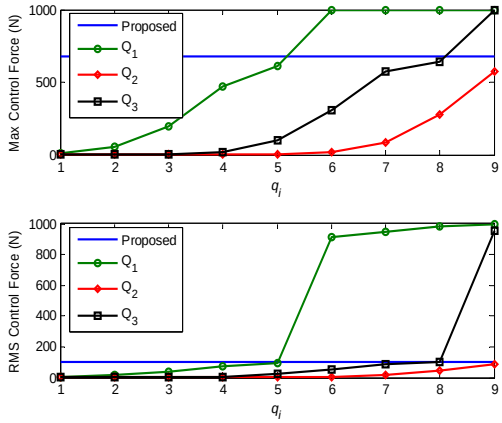


شكل ۵: تغييرات نيروي كنترلي، روش پيشنهادي و Q_1 ، $(q_i=6)$ در تاندون‌هاي فعال طبقه سوم در اثر زلزله السنترو.

مشابه اين حالت در زلزله‌هاي ديگر نيز اتفاق مي‌افتد. براي مثال در زلزله‌هاي هشينوهه و تفت كمترين تغيير مكان سازه در $(q_i=6)$ Q_1 اتفاق مي‌افتد. همانطور كه در شكل‌هاي (۶-۹) نشان داده شده است، هرگونه تغييري در مقدار ماتريس‌هاي وزن سبب تغيير در عملكرد سيـــستم كنترلي و پاسخ سازه مي‌شود.

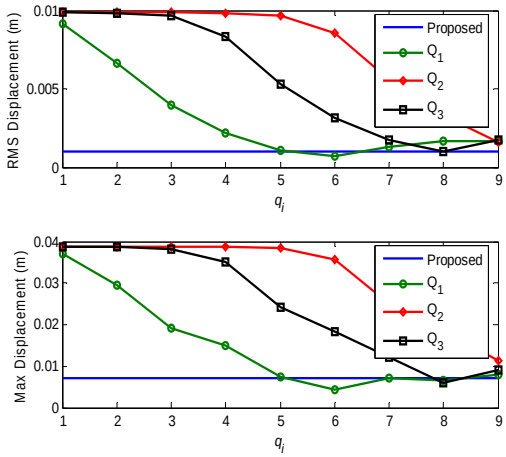


شکل ۶: تغییر مکان طبقه سوم با استفاده از ماتریس‌هاي وزن متفاوت در اثر زلزله هشینوهه.

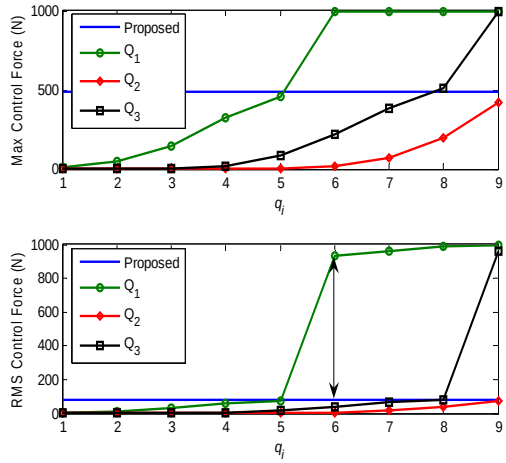


شکل ۷: نیروهاي کنترلي در تاندون فعال طبقه سوم با استفاده از ماتریس‌هاي وزن متفاوت در اثر زلزله هشینوهه.

همانطور که در شکل‌هاي بالا نشان داده شده است، در حالت Q_1 با (q_i=6) پاسخ سازه کمینه مي‌شود اما در این حالت نیروهاي کنترلي سازه بهینه نیستند. در اثر پدیده اشباع شدن، این نیروهاي کنترلي معمولاً بین حد بالا و پایین تغییر مي‌کنند و کنترل مجذور میانگین مربع تبدیل به یك الگوریتم کنترلي Bang-Bang مي‌شود. در نتیجه در طراحي کنترل کننده مناسب، درنظر گرفتن جنبه اقتصادي سیستم‌هاي کنترل فعال که به صورت متوسط و یا بیشینه نیروي کنترلي بیان مي شود بسیار حائز اهمیت مي باشد. تغییرات بین مجذور میانگین مربع نیروهاي کنترلي درحالت Q_1(q_i=6) در اثر زلزله السنترو در حدود ۹ برابر بزرگتر از نیروهاي کنترلي در روش پیشنهادي مي باشد. به طور مشابه این مقدار در اثر زلزله‌هاي هشینوهه و تفت به ترتیب در حدود۱۲ و ۱۵ برابر مي‌باشد درحالیکه تفاوت بین بیشترین کاهش در تغییر مکان طبقه سوم بین حالت Q_1(q_i=6) و حالت پیشنهادي نسبت به حالت کنترل نشده به ترتیب در حدود ۲/۶% و ۲/۹% مي‌باشد.



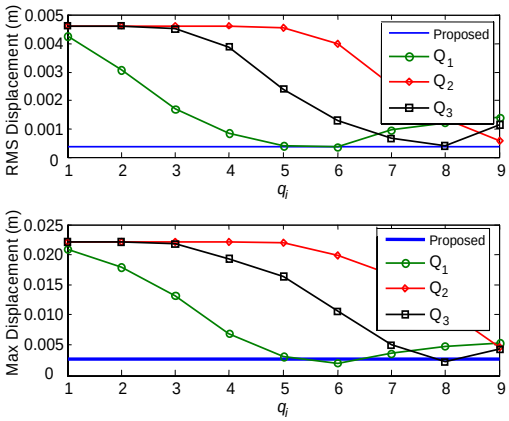
شکل ۸: تغییر مکان طبقه سوم با استفاده از ماتریس‌هاي وزن متفاوت در اثر زلزله تفت.



شکل ۹: نیروهاي کنترلي در تاندون فعال طبقه سوم با استفاده از ماتریس‌هاي وزن متفاوت در اثر زلزله تفت.

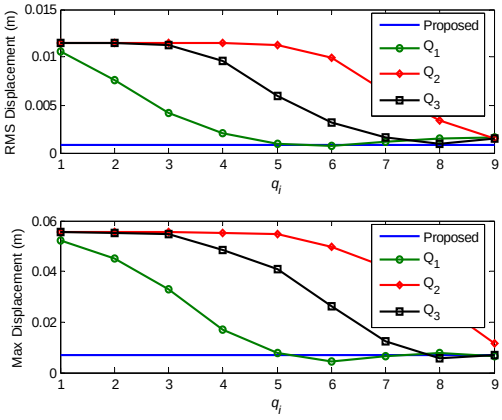
تاثیر مقیاس بر کارایي روش پیشنهادي

به منظور بررسي تاثیر مقیاس نمودن شتابنگاشت زلزله بر عملکرد ماتریس بهره روش پیشنهادي، سازه مثال قبل با سه مقیاس دیگر از زلزله السنترو مورد تحلیل و کنترل قرار گرفت. شکل (۱۰) مقایسه بین متوسط و حداکثر جابجاییهاي بوجود آمده در طبقه سوم را براي الگوریتمهاي مختلف و الگوریتم پیشنهادي براي زلزله السنترو که به میزان ۰/۲ مقیاس شده است نشان میدهد.

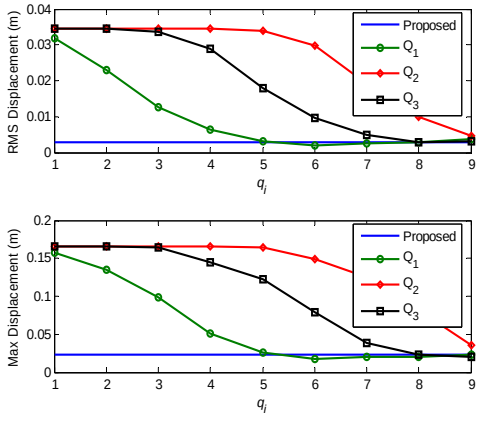


شكل ۱۰: تغيير مكان طبقه سوم با استفاده از ماتريسهاي بهره مختلف براي زلزله السنترو با مقياس ۰/۲.

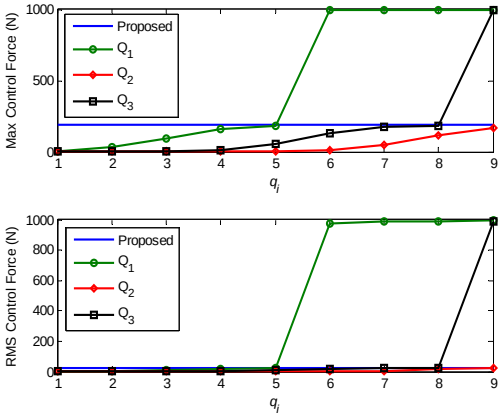
همين مقايسه براي زلزله السنترو هنگامي كه به ميزان ۰/۵ و ۱/۵ برابر مقدار واقعي مقياس شده باشد، بترتيب در شكلهاي (۱۱) و (۱۲) انجام شده است.



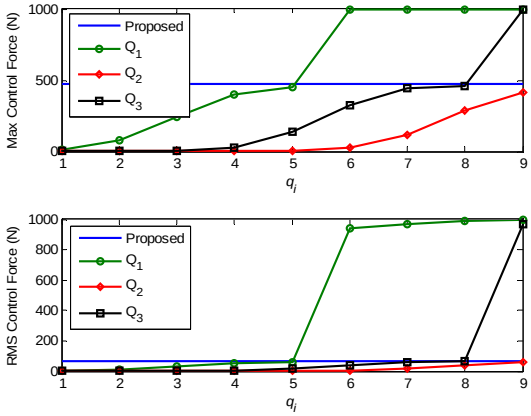
شكل ۱۱: تغيير مكان طبقه سوم با استفاده از ماتريسهاي بهره مختلف براي زلزله السنترو با مقياس ۰/۵.



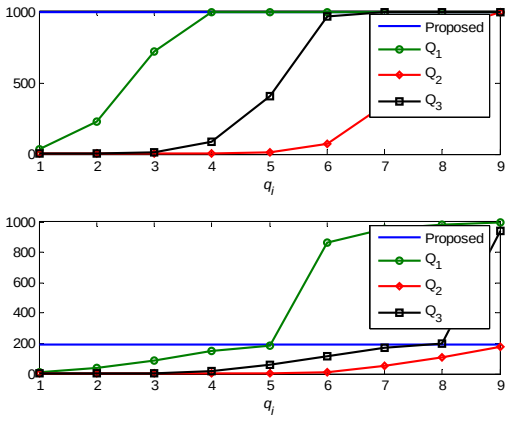
شكل ۱۲: تغيير مكان طبقه سوم با استفاده از ماتريسهاي بهره مختلف براي زلزله السنترو با مقياس ۱/۵.



شكل ۱۳: نيروهاي كنترلي لازم در تاندون طبقه ۳ براي زلزله السنترو با مقياس ۰/۲.



شكل ۱۴: نيروهاي كنترلي لازم در تاندون طبقه ۳ براي زلزله السنترو با مقياس ۰/۵.



شكل ۱۵: نيروهاي كنترلي لازم در تاندون طبقه ۳ براي زلزله السنترو با مقياس ۱/۵.

شكلهاي (۱۰) الي (۱۲) براي زلزله السنترو با مقياسهاي ۰/۲ ، ۰/۵ و ۱/۵ و نيز شكل (۳) براي زلزله السنرو با مقياس كامل نشانگر اين واقعيت هستند كه الگوريتم پيشنهادي در همه حال مي تواند تغيير مكان سازه را به

نحو مطلوب کنترل کند و مقیاس شدن شتاب ورودي زلزله در عملکرد آن تاثيري ندارد.

برتري روش پيشنهادي هنگامي خود را مي نمايا‌ند که مقايسه اي بين نيروهاي کنترلي در الگوريتمهاي مختلف و براي زلزله هاي مقياس شده انجام شود. شکل (۱۳) نيروهاي کنترلي لازم در تاندون طبقه سوم را براي همان زلزله با مقياس ۰/۲ نشان مي دهد.

همچنانکه ملاحظه مي شود، روش پيشنهادي نيروي کنترلي معقولي را براي کنترل سازه ايجاب مي کند و در حاليکه ميانگين اين نيروها براي $q_i<5$ به ميزان جزيي کمتر از نيروي لازم به روش پيشنهادي است، همچنانکه در شکل (۱۰) مشهود است، جابجاييهاي به مراتب کمتري را بدست مي دهد. از سوي ديگر براي مقادير $q_i>5$ در حاليکه روش پيشنهادي مقادير تقريباً همساني را براي جابجايي بدست مي دهد، نيروهاي کنترلي بسيار کمتري را در مقايسه با ساير روشها ايجاب مي کند.

همين نتيجه را مي توان از ملاحظه شکلهاي (۱۴) و (۱۵) که براي زلزله السنترو بترتيب با مقياس ۰/۵ و۱/۵ بدست آمده اند، گرفت. از شکلهاي (۱۴) و (۱۵) با نگاه همزمان به شکلهاي (۱۱) و (۱۲) مي توان دريافت که نتيجه گيري قبلي براي نيروهاي کنترلي، براي زلزله با مقياس ۰/۵ و۱/۵ نيز حاکم است. بنا براين مي توان بعنوان يک نتيجه کلي گفت که کارايي الگوريتم پيشنهادي متاثر از مقياس زلزله نيست و براي زلزله هاي مختلف با مقياسهاي گوناگون ضمن اعمال نيروهاي کنترلي معقول (کم) کنترل مطلوبي روي جابجايي اعمال مي کند بدون آنکه از زلزله ورودي تاثير يابد.

نکته ديگري که از مقايسه شکلهاي (۱۳) الي (۱۵) خصوصاً نيروهاي حداکثري کنترل مي توان ديد آنست که نيروهاي کنترلي حد اکثر بويژه براي Q_1 در حالتيکه $qi>5$ است به حد اکثر نيروي کنترلي رسيده است. در حاليکه نيروي کنترلي حداکثر در روش پيشنهادي متناسب با شدت زلزله تغيير يافته و بطور مثال در حاتيکه زلزله به ميزان ۰/۲ مقياس شده است، نيروي حداکثري کنترلي کمتر از ۳۰% نيروي حداکثري کنترلي به روش Q_1 با $q_i=5$ است.

نتيجه‌گيري

در اين مطالعه با درنظر گرفتن مفهوم انرژي در روش کنترل بهينه LQR، ماتريس بهره بدست آمده سبب کاهش ارتعاشات سازه همراه با محدود کردن نيروي کنترلي مي‌شود.

يك ساختمان سه طبقه با دو تاندون فعال در اثر سه زلزله مختلف آناليز شده و نتايج زير بدست آمده است:

در روش پيشنهادي، کاهش پاسخ سازه نسبت به ديگر ماتريس‌هاي وزن استفاده شده در کنترل بهينه خطي عملکرد مناسب‌تري دارد. کارايي عمده اين الگوريتم بيشتر در اثر اعمال مفهوم انرژي در سازه و تنظيم يکباره آن است. ماتريس‌هاي وزن در اين روش يکبار تنظيم مي‌شوند و اين نتايج براي زلزله‌هاي مختلف قابل کاربرد مي باشند.

نيروهاي کنترلي محاسبه شده در اين روش براساس کمينه کردن انرژي کل سازه در هر گام زماني محاسبه مي‌شوند. بنابراين کمينه کردن شاخص هزينه در روش کنترل بهينه خطي داراي مفهوم فيزيکي مي باشد.

نيروهاي کنترلي بدست آمده از اين روش در مقايسه با روشهاي متداول، صرفنظر از ورودي زلزله معقولتر مي باشند و اين روش براي کاربردهاي عملي مناسبتر است. مقايسه کارايي روش پيشنهادي با روشهاي کلاسيک براي زلزله با مقياسهاي مختلف نيز حاکي از آنست که مقياس شدن زلزله و به عبارت بهتر شدت زلزله ورودي تاثيري در کارايي روش پيشنهادي ندارد.

مراجع

1 - Housner, G. W., Bergman, L A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masaari, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer, B. F. and Yao, J. T. P. (1997)., "Structural control: past, present and future." *Journal of Engineering Mechanics, ASCE*, Vol. 123, No. 9, PP. 897-971.

2 - Aldemir, U., Bakioglu, M. and Akhiev, S. S. (2001). "Optimal control of linear buildings under seismic excitations." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, PP.835-851.

3 - Lynch, J. and Law, K. (2002). "Market-based control of linear structural systems." *Engineering and Structural Dynamics,* Vol. 31, PP.1855-1877.

4 - Yang, N., Lin, S. and Jabbari, S. (2003). "H2-based control strategies for civil engineering structures." *Journal of Structural Control,* Vol. 10, PP.205–230.

5 - Wang, S. (2003). "Robust active control for uncertain structural systems with acceleration sensors." *Journal of Structural Control,* Vol. 10, PP.59-76.

6 - Loh, C., Lin, P. and Chung, N. (1999). "Experimental verification of building control using active bracing system." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* Vol. 28, PP.1099-1119.

7 - Mei1, G., Kareem, A. and Kantor, J. (2001). "Real-time model predictive control of structures under earthquakes." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* Vol. 30, PP.995-1091.

8 - Kim, S. B., Yun, C. and Spencer, B. F. (2004). "Vibration control of wind-excited tall buildings using sliding mode fuzzy control." *Journal of Engineering Mechanics (ASCE),* Vol. 4, PP.505-510.

9 - Singh, M. P., Matheu, E. E. and Suarez, L. E. (1997). "Active and semi-active control of structures under seismic excitation." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics,* Vol. 26, PP.193-213.

10 - Min, K., Hwang, J., Lee, S. and Chung, L. (2003). "Probabilistic approach for active control based on structural energy." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 32, PP.2301-2318.

11 - Wong, K. F. and Yang, R. (2001). "Evaluation of response and energy in actively controlled structures." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 30, PP.1495–1510.

12 - Wong, K. F. and Yang, R. (2001). "Activeness of structural control based on control energy perspectives." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.* Vol. 30, PP.1747–1768.

13 - Uang, C. M. and Bertero, V. V. (1990). "Evaluation of seismic energy in structures." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics.* Vol. 19, PP.77– 90.

14 - Bakioglu, M. and Aldemir, U. (2001). "A new numerical algorithm for sub-optimal control of earthquake excited linear structures." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 50, PP.2601-2616.

15 - Bahar, O., Banan, M. R., Mahzoon, M. and Kitagawa, Y. (2003). "Instantaneous optimal wilson-θ control method." *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, Vol. 11, PP.1268-1276.

16 - Kurata, N., Kobori, T., Takahashi, M., Niwa, N. and Midorikawa, H. (1999). "Actual seismic response controlled building with semi-active damper system." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 28, PP.1427-1447.

17 - Lewis, F. L. and Syrmos, V. L. (1995). *Optimal Control*. Wiley, John & Sons, Incorporated, 2nd edition.

18 - Gluck, N., Reinhorn, A. M., Gluck, J. and Levy, R. (1996). "Design of supplemental dampers for control of structures." *Journal of Structural Engineering,* PP.1394-1399.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - On Line
2 - Sliding Mode Control